



Open Archive Toulouse Archive Ouverte

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/20657>

Official URL:

[https://doi.org/10.1016/S1287-4620\(00\)87009-X](https://doi.org/10.1016/S1287-4620(00)87009-X)

To cite this version:

Jounet, Arnaud and Zappoli, Bernard and Mojtabi, Abdelkader
Simulation numérique de l'Effet Piston avec prise en compte
des échanges thermiques pariétaux. (1999) Comptes Rendus
de l'Académie des Sciences - Series IIB - Mechanics-Physics-
Astronomy, 327 (10). 991-996. ISSN 1287-4620

Any correspondence concerning this service should be sent
to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Simulation numérique de l'Effet Piston avec prise en compte des échanges thermiques pariétaux

Arnaud JOUNET^a, Bernard ZAPPOLI^{a,b}, Abdelkader MOJTABI^a

^a Institut de mécanique des fluides de Toulouse, UMR 5502 CNRS/INP-UPS, UFR MIG, université Paul-Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex, France

E-mail : jounet@lm2f.ups-tlse.fr

^b Centre national d'études spatiales, 18, avenue Édouard-Belin, 31405 Toulouse cedex 04, France

Résumé. Cette étude traite du couplage entre l'Effet Piston et le transfert de chaleur pariétal dans une cellule monodimensionnelle en apesanteur. On montre que le fluide supercritique perçoit indifféremment une condition aux limites proche du thermostat au niveau de la paroi non chauffée, que celle-ci soit isolée ou effectivement thermostatée à sa frontière extérieure. Par ailleurs, la diffusion de la chaleur à travers la paroi chauffée atténue considérablement l'échauffement par Effet Piston. Cette atténuation augmente lorsqu'on s'éloigne du point critique. Enfin, en ce qui concerne l'Accélération Critique, on observe des résultats inverses à ceux que prédit la théorie. © 1999 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Effet Piston / fluides supercritiques / accélération critique

Numerical simulation of the Piston Effect with realistic boundary conditions

Abstract. *The Piston Effect and heat transfer at the boundaries of the near-critical fluid are modelled together. At the non-heated wall, the conditions at the edge of the fluid are close to a thermostat. Heat diffusion into the heating solid leads to much lower heating of the fluid by Piston Effect. This discrepancy increases when moving away from the critical point. Regarding the critical speeding up, our results do not agree with the theory. © 1999 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS*

Piston Effect / near-critical fluids / critical speeding up

Abridged English Version

Since the Piston Effect was demonstrated in 1990 [1–3], it is known why critical speeding up of thermal relaxation, instead of the predicted critical slowing down, occurs in near-critical fluids [4], even though thermal diffusivity becomes lower when approaching the liquid-vapor critical point. Different theoretical [5] and experimental [6] studies have led to a detailed explanation of this mechanism.

Note présentée par René MOREAU.

However, although quite a good agreement has been obtained between these two kinds of investigations, comparison is complicated by the fact that boundary conditions are difficult to control in an experimental device, while they are imposed in a simplified form in analytical works. Ferrell and Hao [7] have shown that the theoretical value of the thermal relaxation characteristic time can be strongly affected when taking into account heat diffusion in the walls of the cell containing the fluid, and increased when approaching the critical point due to the finite value of the thermal conductivity of the wall. In this study, we show that heat transfer in the solids surrounding the domain occupied by the near-critical fluid modifies Piston Effect heating in many different ways.

Thus, we consider the 1D configuration shown in *figure 1*. The evolution of the fluid is modelled by the unsteady and compressible Navier-Stokes equations written on the Piston Effect time scale for a van der Waals fluid close to its critical point [8]. Finite volume discretisation and the SIMPLER algorithm [9] are used for numerical integration. Solids S1 and S2 are taken into account by means of the heat diffusion equation, with the condition that heat flux is continuous at the solid–fluid interfaces.

Figure 2 shows the temperature evolution across the whole domain as heat is injected. In particular, it illustrates the homogeneous and rapid heating caused by the Piston Effect (*figure 2a*), and shows the discontinuity of the thermophysical properties at the interfaces (*figure 2b*). *Figure 3a* shows that Piston Effect heating is decreased compared with that obtained when boundary conditions are imposed at the fluid edges (dashed line). The temperature increases relatively slowly at $x = 0$ (*figure 3b*), and the fluid is submitted to lower heating. Although the difference between the two cases (with or without solids) depends on the thermophysical properties of S1 and on its thickness, these numerical results show that a rather significant difference may appear between experiments (in which solids are present) and a theoretical solution, like that given by a perturbations method (solids are not taken into account in such a case).

Figure 4 shows the results obtained when moving away from the critical point. Heating is now imposed by a constant flux, and we can observe that the difference between Piston Effect heating with (solid lines) and without (dashed lines) solids is more significant and increases continuously. It becomes very large at 15 K above the critical point. But an even more striking result shown by this figure is that Piston Effect heating decreases in the presence of solids when moving away from T'_c , while the opposite occurs in the absence of solids (dashed lines). In the configuration under study, Piston Effect heating results from the competition between a cooling Piston Effect caused by heat losses occurring at $x = 1$ and a heating Piston Effect generated by heat flux injection ($x = 0$), and previous theoretical works [5] have shown that Piston Effect heating should decrease when getting closer to the critical point. Here, this tendency is inverted in the presence of solid elements. This means that when the fluid is submitted to constant heating, certain experimentally obtained results should be in contradiction with those given by the Critical Speeding Up theory.

Further confirmation is required from experiment. A more complete study should soon be published on this question.

1. Introduction

En 1990, trois équipes de nationalités différentes [1–3] ont apporté une explication théorique à l'accélération critique de la relaxation de la température au sein des fluides proches de leur point critique liquide–gaz. Ce phénomène, qui a été observé d'abord en microgravité [4], fut particulièrement remarqué compte tenu du comportement asymptotiquement nul de la diffusivité thermique à l'approche du point critique. Le mécanisme mis en cause repose sur la très grande compressibilité des fluides

critiques : lorsqu'une perturbation de température est imposée à la frontière du domaine occupé par le fluide, c'est le fort couplage thermo-mécanique qui s'opère dans la fine couche limite qui s'est formée qui est responsable de l'évolution rapide et homogène de la température du reste du fluide. Si le fluide subit un chauffage au sein de la couche limite, il se dilate fortement et comprime de façon isentropique tout le fluide situé hors de la couche limite, dont la température augmente alors de façon homogène. Le fluide situé à l'extrémité de la couche limite peut alors être comparé à un piston, et ce mode d'échauffement a été nommé : Effet Piston. Plus le fluide est initialement proche de son point critique, plus l'échauffement par Effet Piston est rapide (il y a : « Accélération Critique »), tandis qu'au contraire, la contribution de la diffusion thermique devient plus faible.

Dans les années qui ont suivi sa découverte, de nombreuses études théoriques se sont attachées à caractériser en détail les propriétés de l'Effet Piston [5]. Parallèlement, un certain nombre d'expériences (par exemple, les expériences ALICE [6]) ont été menées afin de confirmer les premières observations et d'en approfondir la compréhension. Les premières comparaisons entre les modèles analytiques issus des recherches théoriques, en particulier, ceux issus de l'analyse asymptotique, et certains résultats expérimentaux ont alors pu être effectuées, conduisant à un accord assez satisfaisant.

Toutefois, ces premières confrontations ne purent être réalisées qu'au prix d'une adaptation sensible de chacune des deux approches. La situation expérimentale demeure en effet beaucoup plus complexe que celle du cadre dans lequel une étude de nature analytique peut fournir des résultats. Se pose en particulier le problème des conditions aux limites : elles sont généralement difficiles à maîtriser expérimentalement tandis que dans les études analytiques, on leur donne une forme simplifiée.

L'écart observé entre certains résultats expérimentaux et leur modèle théorique a conduit Ferrell et Hao [7] à prendre en compte le couplage thermique entre le fluide et les parois de la cellule le contenant vis-à-vis de la relaxation de la température par Effet Piston : à l'aide d'une modélisation heuristique du problème, ces auteurs ont montré que, très près du point critique, le temps caractéristique de la relaxation de la température finissait par augmenter lorsque l'impédance du fluide (λC_p), en raison de son comportement divergent, devenait grande devant celle des parois.

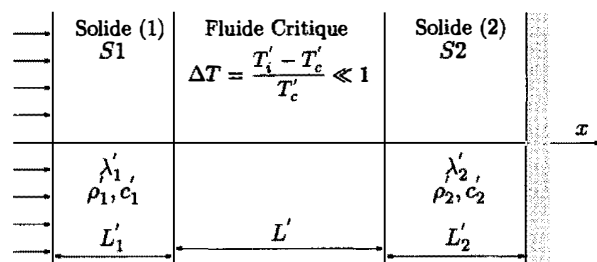
Dans la même optique, l'objet de notre étude a été de mettre en évidence le rôle des parois et, plus généralement, celui des éléments solides en contact avec le fluide critique vis-à-vis de sa réponse en terme d'Effet Piston à un chauffage constant, afin de souligner quelques difficultés auxquelles les expérimentateurs doivent s'attendre lors d'une confrontation avec les résultats théoriques.

2. Position du problème – Modélisation

On considère le problème monodimensionnel représenté sur la *figure 1*.

Figure 1. Configuration.

Figure 1. Configuration.



Dans le fluide, le modèle est identique à celui défini dans [8] : on considère les équations instationnaires et compressibles de Navier-Stokes écrites sur l'échelle de temps de l'Effet Piston pour un fluide de van der Waals proche de son point critique. Le fluide (du CO_2) est initialement au repos à la densité critique et à une température légèrement supérieure à la température initiale ($\Delta T = (T'_i - T'_c)/T'_c \ll 1$). Au sein de chaque solide, dont les propriétés thermophysiques sont celles de matériaux utilisés lors des expériences ALICE [6] (l'élément chauffant (S1) est constitué de zirconium et la paroi extérieure (S2) de l'alliage cuivre-béryllium), l'évolution thermique est régie par l'équation de la chaleur. Le couplage entre les solides et le fluide est assuré grâce à la continuité des flux de chaleur aux interfaces : à chaque pas de temps, on ajuste la température des interfaces tant que cette condition n'est pas vérifiée. La méthode des volumes finis est utilisée pour la discrétisation, et SIMPLER [9] assure le couplage vitesse–pression dans le fluide.

Un chauffage continu est imposé depuis l'extrémité de S1 (i.e., pour $x = -L'_1/L'$), et une condition de thermostat ou d'adiabaticité est maintenue en $x = 1 + L'_2/L'$. L'épaisseur L' a été fixée à 10 mm, et, sauf mention contraire, le système est initialement porté à une température supérieure de 1 K à la température critique.

3. Résultats

Afin d'illustrer l'évolution thermique du système fluide + solides, on a représenté sur la *figure 2* l'évolution du profil de température sur une période de dix fois le temps caractéristique de l'Effet Piston lorsqu'une élévation de température de $\Delta T'_{ch} = 10$ mK est imposée à l'extrémité de S1. L'Effet Piston génère l'échauffement homogène et rapide du fluide (*figure 2a*), alors que la diffusion thermique n'intervient que sur de faibles épaisseurs en dehors des solides. La *figure 2b* représente l'évolution de la couche limite en $x = 0$ et traduit la discontinuité des propriétés thermophysiques à l'interface S1–fluide.

On peut par ailleurs constater sur la *figure 2a* que la température à l'interface $x = 1$ augmente beaucoup moins rapidement que la température dans le fluide : on voit donc que la condition d'adiabaticité imposée en $x = 1 + L'_2/L'$ est loin d'être respectée à l'extrémité du domaine occupé par le fluide, et que la condition thermique effectivement subie à la limite $x = 1$ se rapproche davantage d'un thermostat.

La *figure 3a* représente l'élévation de température par Effet Piston dans le fluide lorsque les éléments solides sont pris en compte (trait plein) ou non (tirets), avec, cette fois-ci, une condition de thermostat imposée à la limite extérieure du domaine. Comme la température en $x = 1$ s'élève relativement peu lorsqu'on simule la présence de S2 (*figure 3b*), ce sont les mécanismes de diffusion au sein de S1 qui sont seuls responsables de l'écart important qui apparaît vis-à-vis de l'échauffement du fluide en

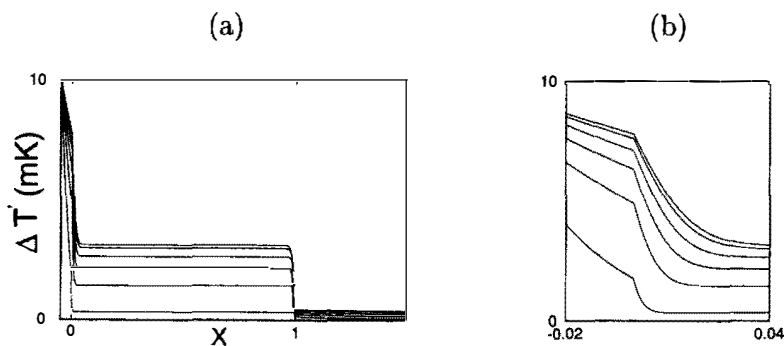
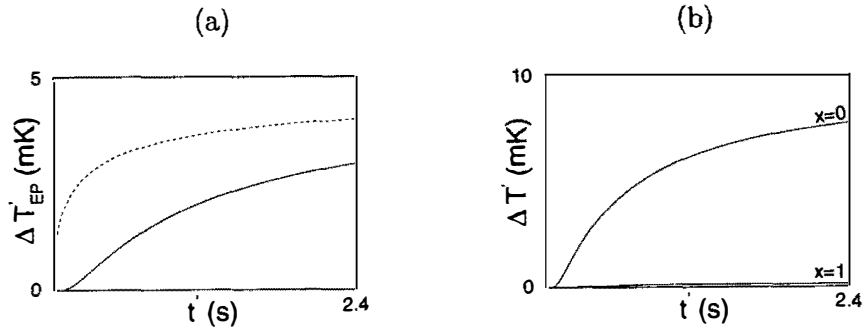


Figure 2. Profils de température à différents instants jusqu'à $t' = 2,4$ s : sur toute l'étendue du domaine (a) et à proximité de l'interface $x = 0$ (b).

Figure 2. Temperature profiles at different times until $t' = 2.4$ s: over the whole domain (a) and close to the interface $x = 0$ (b).

Figure 3. Élévation de température par Effet Piston lorsqu'une élévation de température de $\Delta T'_{ch} = 10$ mK est imposée, avec (trait plein) ou sans (tirets) éléments solides autour du fluide (a) ; variations de température aux interfaces (b).

Figure 3. *Piston Effect temperature increase when $\Delta T'_{ch} = 10$ mK heating is imposed, with (solid line) or without (dashed line) solid elements around the fluid (a); temperature variations at the interfaces (b).*

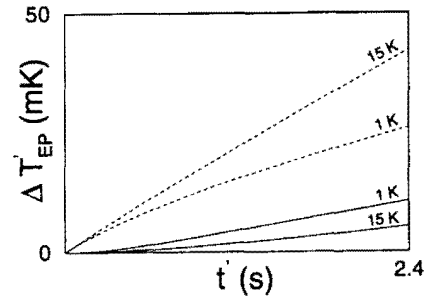


l'absence de solides. En présence de S1, la température de consigne réellement perçue par le fluide demeure plus faible que celle qui est imposée ($\Delta T'_{ch} = 10$ mK) et l'échauffement par Effet Piston est plus faible. Cette atténuation dépend bien évidemment de l'épaisseur et des propriétés de S1, mais on voit que lorsqu'on se rapproche des conditions expérimentales, la solution numérique avec solides fournit des résultats assez éloignés de ceux qu'on obtient en l'absence de solides, i.e., de ceux que fournirait l'analyse asymptotique.

Un paramètre important dans l'étude de l'Effet Piston est la proximité initiale au point critique. La figure 4 représente l'élévation de température dans le fluide pour deux proximités initiales au point critique (1 K et 15 K) lorsqu'on considère ou non la présence des solides. Tout d'abord, on peut constater qu'ici, lorsque le chauffage est imprimé par un flux constant ($q'_{ch} = 50 \text{ W.m}^{-2}$), l'écart entre la solution avec solides et sans solides est beaucoup plus important que précédemment et s'élève continûment. On peut également constater que cet écart augmente lorsqu'on s'éloigne du point critique, et que l'atténuation causée par la prise en compte de S1 peut devenir très importante (à 15 K de T'_c , on obtient un facteur proche de 10).

Figure 4. Élévation de température par Effet Piston lorsqu'un chauffage de $q'_{ch} = 50 \text{ W.m}^{-2}$ est imposé, avec (traits pleins) ou sans (tirets) éléments solides autour du fluide, à 1 K et 15 K au-dessus de la température critique.

Figure 4. *Piston Effect temperature increase when $q'_{ch} = 50 \text{ W.m}^{-2}$ heating is imposed, with (solid line) or without (dashed line) solid elements around the fluid, at 1 K and 15 K above the critical temperature.*



Toutefois, le résultat le plus frappant qui apparaît sur ces courbes est peut-être l'inversion des courbes 1–15 K lorsqu'on applique les conditions aux limites aux extrémités des solides : l'échauf-

fement par Effet Piston devient plus faible à 15 K du point critique qu'à 1 K. Comme ici, un flux de chaleur est évacué du fluide à son extrémité non chauffée ($x = 1$), l'échauffement global par Effet Piston résulte de la compétition entre l'Effet Piston chauffant généré par l'injection de chaleur ($x = 0$) et un Effet Piston refroidissant induit par la rétractation thermo-mécanique du fluide situé dans la couche limite froide [5]. Dans ces conditions, il a été montré de façon théorique [5] qu'à l'approche du point critique, le fluide tend à se comporter comme un « court-circuit thermique », dans le sens où la chaleur injectée tend à être évacuée instantanément sans que le fluide ait le temps de s'échauffer. L'Accélération Critique se traduit alors par un échauffement de plus en plus faible, ce qui est illustré par les courbes en tirets (en l'absence de solide) sur la *figure 4*. On voit donc qu'en présence de solides, cette tendance est inversée. Cela signifie que quand un fluide critique est soumis à un chauffage continu, l'expérience doit fournir des résultats en contradiction avec ceux que prévoit la théorie de l'Accélération Critique.

4. Conclusion

Les résultats qui viennent d'être présentés soulignent l'importance capitale de l'interaction entre un fluide critique et des éléments solides conductifs vis-à-vis de l'Effet Piston. On a montré dans un premier temps que la présence de parois impliquait nécessairement une condition de thermostat aux limites du domaine occupé par le fluide, et que la diffusion thermique au sein de l'élément chauffant pouvait réduire considérablement l'échauffement par Effet Piston. En faisant varier la proximité initiale au point critique, on a mis en évidence un changement de comportement plus fondamental par rapport aux résultats théoriques : l'Accélération Critique se traduirait expérimentalement d'une façon inverse à ce que prédit la théorie. Tout cela reste à approfondir par une étude paramétrique plus détaillée, et devra faire l'objet d'une vérification expérimentale. L'analyse complète des mécanismes responsables de ce phénomène est en cours.

Remerciements. Les auteurs remercient Y. Garrabos pour les discussions intéressantes qu'ils ont eues sur le sujet.

Références bibliographiques

- [1] Onuki A., Hao H., Ferrell R.A., Fast adiabatic equilibrium in a single component fluid near the liquid-vapor critical point, *Phys. Rev. A* 41 (1990) 2256.
- [2] Boukari H., Shaumeyer J.N., Briggs M.E., Gammon R.W., Critical speeding up in pure fluids, *Phys. Rev. A* 41 (1990) 2260.
- [3] Zappoli B., Bailly D., Garrabos Y., Le Neindre B., Guenoun P., Beysens D., Anomalous heat transport by the piston-effect in supercritical fluids under zero gravity, *Phys. Rev. A* 41 (1990) 2264.
- [4] Nitsche K., Straub J., The critical 'hump' of C_v under microgravity, results from the D-Spacelab experiment 'Wärmekapazität', Proceedings of the 6th European Symposium on Material Sciences under microgravity conditions, 1987, ESA SP-256.
- [5] Zappoli B., Carlès P., Thermoacoustic nature of the critical speeding-up, *Eur. J. Mech. B* 14 (1995) 41–65.
- [6] Garrabos Y., Bonetti M., Beysens D., Perrot F., Fröhlich T., Carlès P., Zappoli B., Relaxation of a supercritical fluid after a heat pulse in the absence of gravity effects: Theory and experiments, *Phys. Rev. E* 57 (1998) 1–17.
- [7] Ferrell R.A., Hao H., Adiabatic temperature changes in a single-component fluid near the liquid-vapor critical point, *Physica A* 197 (1993) 23–46.
- [8] Zappoli B., Amiroudine S., Carlès P., Ouazzani J., Thermoacoustic and Buoyancy-driven transport in a square side heated cavity filled with a near critical fluid, *J. Fluid Mech.* 316 (1996) 53–72.
- [9] Patankar S.V., Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere, Washington, D.C., 1980.